

DISPOSITIF ET PROCÉDÉ DE DÉTERMINATION DE CHEMINS DE ROUTAGE DANS UN RÉSEAU DE COMMUNICATIONS, EN PRÉSENCE D'ATTRIBUTS DE SÉLECTION

5 L'invention concerne le domaine des communications entre terminaux au sein d'un réseau, et plus particulièrement celui de la détermination des chemins (ou trajets) de routage de données entre des terminaux source et destinataire(s).

10 En raison de la croissance exponentielle du trafic au sein des réseaux de communications publics, tels qu'Internet, les opérateurs des réseaux sont de plus en plus souvent confrontés à des problèmes de congestion de réseau. Cela résulte, notamment, des méthodes employées pour déterminer les chemins de routage des données parmi 15 les nœuds des réseaux. En effet, les méthodes de routage traditionnelles n'étant pas contraintes et, pour la plupart d'entre elles, reposant sur la détermination du chemin le plus court entre les terminaux source et destinataire(s), la plus grande partie du trafic est dirigée suivant un même chemin, qui se trouve de ce fait congestionné, alors même que de nombreux autres chemins, qui pourraient s'avérer mieux adaptés compte tenu d'autres critères que la 20 longueur, restent sous-utilisés.

De plus, la longueur du chemin de routage n'est pas nécessairement le critère le plus important. D'autres critères peuvent 25 s'avérer beaucoup plus pertinents dans certaines applications, comme par exemple la bande passante requise.

Pour tenter de remédier à cet inconvénient, plusieurs solutions ont été envisagées. Il a ainsi été proposé de déterminer les chemins de 30 routage à l'aide de combinaisons linéaires de critères additifs. Mais,

d'une part, l'agrégation de composantes hétérogènes à l'aide de combinaisons linéaires n'a pas réellement de signification, et d'autre part, cela fournit un jeu de chemins qui ne contient pas obligatoirement le meilleur.

5

Deux autres solutions ont été plus récemment proposées pour tenter d'améliorer la situation soit pour le routage standard (ou « best effort routing »), caractérisé par la prise en compte de critères en l'absence de contraintes, soit pour le routage intégrant la qualité de service (ou QoS routing pour « Quality of Service routing»), caractérisé par la prise en compte de critères en présence de contraintes.

Une première solution concerne le routage multi-critères de type best effort. Elle consiste à calculer des chemins de façon séquentielle en utilisant des critères additifs, puis à les comparer en utilisant des critères de type additif et non additif. Du fait du traitement séquentiel, cette solution requiert beaucoup de temps de calcul. De plus, cette solution impose que l'on choisisse un chemin parmi un jeu qui ne contient pas forcément le meilleur chemin.

20

Une seconde solution concerne le routage multi-critères de type QoS. Cette solution, connue sous l'acronyme anglais TAMCRA (pour « Tunable Accuracy Multiple Constraints Routing Algorithm »), consiste à sélectionner au niveau de chaque nœud intermédiaire du réseau les k plus petits chemins parmi un jeu de chemins dits « non dominés ». Les critères utilisés dans le calcul sont tous de type additif, et sont chacun contraints par une limite supérieure. Les critères de type non additif, tels que la bande passante, sont introduits sous forme de contraintes avant le début du calcul, dans le but de supprimer les liens inter-nœuds qui ne satisfont pas à l'une au moins desdites contraintes. Cette solution est notamment décrite dans le

document de H. De Neve et P. Van Mieghem, « A Tunable Accuracy Multiple Constraints Routing Algorithm », Computer Communication, Vol. 23, pages 667–670, 2000.

Une version améliorée de l'algorithme, appelée SAMCRA (Self-
5 Adaptive Multiple Constraints Routing Algorithm), a été présentée dans l'article « Hop-by-hop quality of service routing » de Piet Van Mieghem, Hans De Neve et Fernando Kuipers, paru dans la revue « *Computer Networks* », vol. 37, 2001.

10 Comme pour la première solution, cette seconde solution (tant TAMCRA que sa version améliorée SAMCRA) peut ne pas fournir le meilleur chemin étant donné qu'elle ne prend pas en compte tous les chemins intermédiaires. De plus, cette solution ne peut s'appliquer qu'au routage de type QoS étant donné que la détermination des chemins repose sur une comparaison à des seuils, formant
15 contraintes, appliqués à des critères.

Aucune solution connue n'apporte donc une entière satisfaction, notamment pour ce qui concerne la prise en compte du critère de bande passante pendant la phase de détermination des chemins de routage et/ou l'aptitude à être utilisée aussi bien pour le routage de type best effort que pour le routage de type QoS.
20

L'invention a donc pour but de remédier à tout ou partie des inconvénients précités.

25 Elle propose à cet effet un procédé de détermination de chemin(s) de routage de données dans un réseau de communications, comportant une multiplicité de nœuds, comprenant les étapes suivantes :

- 30 a) s'assurer de la connexité d'une partie au moins de la multiplicité de nœuds,
- b) parmi les nœuds de cette partie, calculer des chemins possibles

entre un nœud de départ et un nœud d'arrivée, compte tenu d'au moins deux critères choisis, puis déduire une solution idéale à partir de performances des chemins possibles sur les critères,

- 5 c) attribuer à chaque chemin possible une valeur d'intérêt compte tenu de la solution idéale, puis classer les chemins possibles compte tenu de leurs valeurs d'intérêt respectives, et
- d) sélectionner parmi les chemins possibles classés les k chemins les mieux classés, de manière à router des données via l'un de ces k chemins.

10

Par définition, deux nœuds sont dits « connexes » s'ils peuvent s'échanger des données directement ou indirectement par l'intermédiaire d'un ou plusieurs autres nœuds. Autrement dit, si l'on considère un graphe de nœuds, ce graphe est dit connexe si chaque couple de nœuds peut être relié par un chemin.

Le procédé selon l'invention, qui peut servir, dans le mode de base présenté ci-dessus, au routage de type best effort, peut également servir au routage de type QoS. Pour ce faire, on peut, au début de l'étape a), commencer par déterminer parmi la multiplicité de nœuds tous les couples de noeuds qui peuvent établir entre-eux une liaison orientée supportant toutes les contraintes locales choisies, puis s'assurer de la connexité de l'ensemble des noeuds de ces couples. En variante ou en complément, on peut, à la fin de l'étape b), retenir parmi les chemins possibles ceux qui satisfont à toutes les contraintes globales choisies, de sorte qu'à l'étape c) on attribue des valeurs d'intérêt aux chemins possibles retenus.

On entend ici par « contrainte locale » une contrainte appliquée sur des liens (ou liaisons) orientés, tels que des arcs. Par ailleurs, on entend ici par « contrainte globale » une contrainte appliquée sur un

chemin, comme par exemple le nombre de sauts du chemin ou la durée maximale du chemin.

Dans le cas du routage de type best effort, il est préférable de s'assurer de la connexité de l'ensemble des nœuds de la multiplicité, 5 étant donné que ces nœuds ne font pas l'objet d'une sélection préalable, par exemple à l'aide de contraintes locales.

Préférentiellement, au moins l'un des critères utilisés est de type non additif. Dans ce cas, il est avantageux d'intégrer, lors de l'étape b), une trace mémorisant un parcours correspondant à un 10 chemin partiel, de manière à détecter et prévenir l'apparition de cycles (ou boucles) dans les chemins en cours de construction. Et, il est encore plus avantageux de conserver certaines solutions, dites « faiblement non dominées » sur le critère non additif, lors de la procédure d'élimination des chemins partiels.

15

Le procédé selon l'invention pourra comporter de nombreuses caractéristiques complémentaires qui pourront être prises séparément et/ou en combinaison, et en particulier :

- la connexité (qui est une contrainte) est préférentiellement vérifiée 20 par un mécanisme de propagation du nœud de départ vers tous les autres nœuds de la multiplicité de nœuds, afin que chaque nœud soit visité. Pour ce faire, on peut, par exemple, utiliser l'algorithme de Tarjan ;
- on peut déterminer à l'étape b), pour chaque chemin, des valeurs 25 représentatives de sa « performance » par rapport à chacun des critères choisis, puis qualifier de chemin possible chaque chemin dont les valeurs de performance sont « non dominées ». Dans ce cas, on peut déterminer, toujours à l'étape b) et pour chaque critère, la meilleure valeur de performance observée sur les chemins possibles, dite « valeur optimale », puis construire la solution idéale 30 sous la forme d'un multiplet de composantes constituées des

- différentes valeurs optimales déterminées. En fait, les liaisons sur lesquelles les valeurs optimales sont observées constituent rarement une séquence connexe. Autrement dit, un chemin idéal correspondant à une solution idéale n'existe qu'exceptionnellement ;
- à l'étape c) la valeur d'intérêt attribuée à chaque chemin possible caractérise préférentiellement la plus grande valeur des composantes, associées aux différents critères choisis, d'une fonction de Tchebychev pondérée, fonction des différences entre la valeur de performance du chemin concerné et la composante correspondante de la solution idéale. Dans ce cas, les k chemins possibles retenus présentent les k plus petites valeurs d'intérêt.

L'invention porte également sur un dispositif de détermination de chemin(s) de routage de données dans un réseau de communications comportant une multiplicité de nœuds. Ce dispositif se caractérise par le fait qu'il comporte des moyens de traitement capables de :

- a) s'assurer de la connexité d'une partie au moins de la multiplicité de nœuds,
- b) parmi les nœuds de cette partie, calculer des chemins possibles entre un nœud de départ et un nœud d'arrivée, compte tenu d'au moins deux critères choisis, puis déduire une solution idéale à partir de performances des chemins possibles sur lesdits critères,
- c) attribuer à chaque chemin possible une valeur d'intérêt compte tenu de la solution idéale, puis classer les chemins possibles compte tenu de leurs valeurs d'intérêt respectives, et
- d) sélectionner parmi les chemins possibles classés les k chemins les mieux classés, de manière à router des données via l'un de ces k chemins.

Le dispositif selon l'invention, qui peut servir, dans le mode de base présenté ci-dessus, au routage de type best effort, peut également servir au routage de type QoS. Pour ce faire, les moyens de traitement peuvent être agencés de manière à commencer par déterminer parmi la multiplicité de nœuds tous les couples de noeuds qui peuvent établir entre-eux une liaison orientée supportant toutes les contraintes locales choisies, puis à s'assurer de la connexité de l'ensemble des noeuds de ces couples. En variante ou en complément, les moyens de traitement peuvent être agencés de manière à ne retenir parmi les chemins possibles que ceux qui satisfont à toutes les contraintes globales choisies, afin de n'attribuer des valeurs d'intérêt qu'aux chemins possibles retenus.

Lorsque l'un au moins des critères utilisés est de type non additif, il est avantageux que les moyens de traitement soient agencés de manière à intégrer dans le calcul des chemins possibles une trace mémorisant un parcours correspondant à un chemin partiel, de manière à détecter et prévenir l'apparition de cycles dans les chemins en cours de construction. Et, il est encore plus avantageux que les moyens de traitement soient capables de conserver certaines solutions, dites « faiblement non dominées » sur le critère non additif, lors de la procédure d'élimination des chemins partiels.

Les moyens de traitement du dispositif selon l'invention pourront comporter de nombreuses caractéristiques complémentaires qui pourront être prises séparément et/ou en combinaison, et en particulier ils pourront :

- s'assurer de la connexité à partir d'un mécanisme de propagation du nœud de départ vers tous les autres nœuds de la multiplicité de nœuds, afin que chaque nœud soit visité (ou testé) ;
- lors du calcul des chemins possibles, déterminer pour chaque chemin, des valeurs représentatives de sa « performance » par

- rapport à chacun des critères choisis, puis attribuer la qualité de chemin possible à chaque chemin dont les valeurs de performance sont « non dominées ». Dans ce cas, les moyens de traitement peuvent être agencés de manière à déterminer pour chaque critère la meilleure valeur de performance observée sur les chemins possibles, dite « valeur optimale », puis construire la solution idéale sous la forme d'un multiplet de composantes constituées des différentes valeurs optimales déterminées ;
- attribuer à chaque chemin possible une valeur d'intérêt qui caractérise préférentiellement la plus grande valeur des composantes, associées aux différents critères choisis, d'une fonction de Tchebychev pondérée, fonction des différences entre la valeur de performance du chemin concerné et la composante correspondante de la solution idéale. Dans ce cas, les k chemins possibles retenus présentent les k plus petites valeurs d'intérêt.

Qu'il s'agisse du procédé ou du dispositif selon l'invention, il est préférable que :

- les éventuelles contraintes locales et/ou globales soient choisies dans un groupe comprenant au moins la bande passante minimale requise, la longueur maximale du chemin, la durée maximale du chemin, au moins une liaison interdite, le nombre de sauts du chemin et une restriction de couleur de chemin ;
- les critères soient choisis dans un groupe comprenant au moins la bande passante disponible, le nombre de sauts du chemin et la durée du chemin. Dans ce cas, il est encore plus préférable que les deux critères choisis soient la bande passante disponible et la durée du chemin. Pendant l'étape b) (ou à l'aide des moyens de traitement), on peut alors avantageusement, impacter (ou pondérer) le critère portant sur la durée du chemin par une pénalité portant, par exemple, sur le coût d'administration du chemin ;

- les critères soient choisis en fonction du type de service requis ;
 - les critères choisis soient pondérés en fonction de leur importance compte tenu d'informations de gestion ;
 - les éventuelles contraintes et leurs valeurs associées soient choisies en fonction de la qualité de service requise.
- 5

Par ailleurs, l'invention peut notamment être mise en œuvre dans les réseaux de communications IP.

10 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée ci-après, et des dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 illustre de façon schématique une partie d'un réseau de communications comportant une multiplicité de nœuds équipés d'un dispositif de calcul de chemins de routage selon l'invention, et
 - la figure 2 est un graphe illustrant de façon schématique le mode de détermination de solutions dites « non dominées ».
- 15

Les dessins annexés sont, pour l'essentiel, de caractère certain.
20 En conséquence, ils pourront non seulement servir à compléter l'invention, mais aussi contribuer à sa définition, le cas échéant.

Comme cela est illustré sur la figure 1, un réseau de communications IP comporte généralement une multiplicité de terminaux de commutation ou routage Nn (ici n = 1 à 7), également 25 appelés nœuds, à certains desquels sont connectés des terminaux d'utilisateurs ou d'entreprises Tm (ici m = 1 à 4). Lorsqu'un terminal d'utilisateur ou d'entreprise Tm, dit terminal source, souhaite transmettre des données à un ou plusieurs autres terminaux d'utilisateurs ou d'entreprises, dits terminaux destinataires, il récupère 30 la ou les adresses IP du ou des terminaux destinataires, puis le nœud

Nn auquel il est connecté détermine à l'aide d'un module de calcul de chemins et selon le protocole de routage distribué du réseau, comme par exemple OSPF (pour « Open Shortest Path First »), le chemin (ou trajet) qui doit permettre d'acheminer au mieux les données du terminal source vers les terminaux destinataires. Chaque nœud d'un réseau IP comporte un module de calcul de chemins qui détermine le prochain nœud adjacent (« next hop ») auquel il doit transmettre les paquets de données qui sont ainsi acheminés pas à pas.

On entend ici par « chemin » une suite ordonnée de nœuds ou de liaisons (entre deux nœuds i et j). Bien entendu, un chemin peut être modifié en cours de transfert de données, par exemple pour tenir compte d'un problème matériel. Par conséquent, tous les nœuds Nn d'un réseau sont généralement aptes à calculer un chemin de routage conformément au protocole de routage distribué du réseau.

Dans ce qui suit, on considère que le réseau de communications est un réseau IP.

Le dispositif de l'invention est un module de calcul de chemins de routage. Il est donc destiné à être installé dans chaque nœud Nn d'un réseau de communications, de manière à calculer le chemin le mieux adapté à la transmission de données entre un terminal source et un terminal destinataire (ou plusieurs). Il peut, par ailleurs, être couplé à un protocole de routage, tel que le protocole de routage d'état de liaison OSPF, dès lors que ledit protocole supporte une gestion de trafic de type TE-LSA (pour « Trafic Engineering - Link State Advertisement »).

Le dispositif D selon l'invention est destiné au calcul de chemins de routage multi-critères avec ou sans contraintes. Il est donc adapté au routage de type best effort comme au routage de type QoS.

Le dispositif D comporte un module de traitement M, qui peut

être réalisé sous la forme de circuits électroniques, de modules logiciels (ou informatiques), ou d'une combinaison de circuits et de logiciels. Ce module de traitement M peut accéder aux informations sur l'état d'utilisation du réseau, via les TE-LSAs, ainsi qu'à la topologie du réseau, et par conséquent à la liste de ses nœuds Nn, qui est généralement stockée dans une mémoire du nœud dans lequel il est implanté, régulièrement mise à jour.

Dans ce qui suit, on va décrire un mode de réalisation du dispositif selon l'invention, adapté au routage de type QoS, qui se caractérise par la prise en compte de critères en présence de contraintes locales et/ou globales. Mais, comme mentionné précédemment, le dispositif est également adapté au routage de base, de type best effort, qui se caractérise par la prise en compte de critères en l'absence de contraintes.

Lorsque le module de traitement M reçoit une demande de calcul de chemin, il commence tout d'abord par se procurer la topologie et l'état d'utilisation du réseau, de manière à déterminer tous les couples de noeuds qui peuvent établir entre-eux une liaison (ou un lien, défini par un couple (i,j) désignant deux nœuds) supportant chaque contrainte locale choisie.

On entend ici par « contrainte locale » toute contrainte applicable à une liaison orientée d'un réseau, telle qu'un arc, et notamment la bande passante minimale requise, la longueur maximale d'une liaison, la durée maximale d'une liaison, une ou plusieurs liaisons interdites.

Dans le cas d'un routage de type best effort, ce début de traitement est bien entendu omis puisque l'on n'utilise pas de contraintes.

Préférentiellement, cette détermination de couples de nœuds s'effectue à partir de l'établissement d'un graphe de filtrage $G(X,U)$, où X représente le jeu de nœuds Nn du réseau et U le jeu de liens (ou liaisons) directionnels (i,j) . Toutes les liaisons du graphe $G(X,U)$ qui 5 violent au moins l'une des contraintes locales choisies sont éliminées dudit graphe, ce qui produit un graphe « filtré ».

Le module de traitement M s'assure ensuite que le graphe $G(X,U)$ filtré est connexe (au sens mathématique du terme). Il utilise pour ce faire, préférentiellement, une technique de propagation 10 d'information du nœud source Ns vers l'ensemble des nœuds Nn du graphe filtré, de sorte que tous les nœuds soient vérifiés (ou testés). Cette vérification de la connexité du graphe peut être réalisée, par exemple, avec l'algorithme de Tarjan.

15 Dans le cas d'un routage de type best effort, la vérification de la connexité sur une partie au moins des nœuds du graphe, mais de préférence sur tous les nœuds du graphe, constitue le début du traitement.

En l'absence de connexité du graphe filtré (ou non, dans le cas 20 du best effort), le reste du traitement ne peut pas être effectué.

Si le graphe filtré (ou non) est connexe, le module de traitement M calcule parmi les nœuds des couples (ou liaisons (i,j)) retenus tous les chemins possibles (ou « efficient paths ») r^* entre un nœud de départ, par exemple $N3$, auquel est connecté le terminal 25 source, par exemple $T1$, et un nœud d'arrivée, par exemple $N6$, auquel est connecté le terminal destinataire, par exemple $T3$, en prenant en compte au moins deux critères choisis.

On entend ici par « chemin possible » un chemin dit «efficace » ou « Pareto-optimal » dont les valeurs de performances, sur lesquelles 30 on reviendra plus loin, sont « non dominées ». Par ailleurs, on entend ici par « critère » tout type de critère (ou métrique) pouvant être pris en

compte dans un réseau, qu'il soit de type additif, comme par exemple la durée du chemin C1 ou le nombre de sauts du chemin C3, ou de type non additif, comme par exemple la bande passante disponible C2 (qui est de surcroît de type « minimum–maximum »). C1 et C2 sont 5 des critères dits de haut niveau, tandis que C3 est un critère dit de bas niveau Par conséquent, les critères C1 et C2 sont, préférentiellement, toujours pris en compte, tandis que le critère C3 est optionnel.

Par ailleurs, il peut être intéressant d'impacter (ou pondérer) le 10 critère C1 (durée du chemin) par une pénalité portant, par exemple, sur le coût d'administration du chemin CA. Cela permet de réduire les vecteurs de calcul, sur lesquels on reviendra plus loin, d'une dimension, et par conséquent de limiter le temps de calcul et la mémoire nécessaire audit calcul.

15

PREFERENTIELLEMENT, un chemin possible r^* est calculé comme indiqué ci-après. Tout d'abord, un chemin est désigné par une variable $r(s,t)$, où s désigne le nœud source et t le nœud destinataire, ainsi que par un vecteur de performance $Z(r)$ défini par un multiplet de 20 composantes ($Z_1(r), Z_2(r), \dots, Z_p(r)$) associées chacune à l'un des p critères utilisés. Par exemple, la composante $Z_1(r)$ représente la performance du chemin r par rapport au critère C1 et la composante $Z_2(r)$ représente la performance du chemin r par rapport au critère C2.

Pour un critère de type additif, tel que C1, la composante $Z_1(r)$ 25 de la performance $Z(r)$ est définie par la relation $Z_1(r) = \sum_{(i,j) \in r} C1(i, j)$.

Lorsque le critère C1 est impacté (ou pondéré) par la pénalité CA, la relation précédente s'écrit $Z_1(r) = \sum_{(i,j) \in r} C1(i, j) * CA(i, j)$.

Pour un critère de type non additif, tel que C2, la composante 30 $Z_2(r)$ de la performance $Z(r)$ est définie par la relation $Z_2(r) = MIN_{(i,j) \in r} C2(i, j)$.

Ici, $C_p(i,j)$ désigne la valeur du critère C_p pour un arc (i,j) .

Compte tenu de ces définitions, un chemin est qualifié de chemin possible $r^*(s,t)$, c'est à dire « efficace », si il n'existe pas de chemin envisageable entre les nœuds s et t vérifiant la relation : $Z_p(r) \leq Z_p(r^*)$, $\forall p = 1 \text{ à } P$ (où P est le nombre total de critères utilisés), et $Z_{p'}(r) < Z_{p'}(r^*)$ pour l'une quelconque de ces composantes p appartenant à l'ensemble $\{1, \dots, P\}$.

Le vecteur de performance $Z(r^*)$ du chemin r^* est alors appelé solution « non dominée » (ou NDS pour « Non-Dominated Solution ») lorsque tout autre chemin r' possède un vecteur de performance $Z(r')$ dont l'une au moins des composantes $Z_p(r')$ est « moins bonne » (ou « moins performante ») que la composante correspondante $Z_p(r^*)$ du chemin r^* . Un tel chemin r^* , associé à un vecteur de performance non dominé, est alors appelé chemin possible (ou « efficient path ») ou « Pareto-optimal ».

Un exemple de détermination de solution non dominée (ou NDS) est illustré sur la figure 2, dans le cas de deux critères C_1 et C_2 , de type commensurable, c'est-à-dire dont les dimensions métriques peuvent faire l'objet d'addition(s) et de multiplication(s). Cela s'applique également aux grandeurs incommensurables, telles que la bande passante C_2 . Cela s'applique également à des ensembles de grandeurs incommensurables entre-elles telles que la durée du chemin C_1 et la bande passante C_2 .

Dans cet exemple, $Z(r^*)$ est une solution non dominée (ou NDS), puisqu'il n'existe pas d'autre point dont toutes les coordonnées sont strictement inférieures à celles de $Z(r^*)$. Chaque autre point $Z(r)$ possède au moins une composante qui est moins bonne que la composante correspondante de $Z(r^*)$. En d'autres termes, le cône, matérialisé par des tirets et placé en-dessous et à gauche de $Z(r^*)$, est vide. Dans cet exemple, $Z(r')$ est dominé par quatre points, dont $Z(r^*)$, qui se trouvent placés dans le cône matérialisé par des tirets placé en-

dessous de lui, mais pas par les points extrêmes $Z1(r)_{\min/C1}$, associé à C1, et $Z2(r)_{\min/C2}$, associé à C2, qui sont donc également non dominés. Seule $Z(r')$ est ici une solution dominée. Par ailleurs, $Z(r'')$ est une solution dite « faiblement non dominée » par $Z(r^\circ)$ car l'une au moins des composantes de $Z(r^\circ)$ est égale (et non strictement inférieure) à son homologue dans $Z(r'')$.

Afin de calculer les différents chemins possibles r^* obtenus par la méthode présentée ci-avant, on peut utiliser une adaptation d'un algorithme d'attribution de label, du type de celui décrit dans le 10 document de E. Martins, « On a multi-criteria shortest path problem », European Journal Of Operational Research, Vol.16, pages 236–245, 1984.

L'adaptation consiste, notamment, à intégrer aux critères additifs traités par l'algorithme de Martins un critère de type non 15 additif, comme par exemple un critère de type « minimum-maximum ». L'intégration d'un tel critère impose des aménagements de l'algorithme, comme par exemple ceux mentionnés ci-dessous.

Un premier aménagement peut consister à intégrer à l'algorithme de calcul de chemins (correspondant à l'étape b) du 20 procédé) une trace mémorisant le parcours correspondant à un chemin partiel, afin de détecter et prévenir l'apparition, dans les chemins en cours de construction, de cycles (ou boucles) lors de la progression de l'algorithme.

Un second aménagement, de préférence combiné au premier, 25 peut consister à conserver des solutions faiblement non dominées sur le critère « minimum-maximum » lors de la procédure d'élimination des chemins partiels. Par exemple, si l'on considère trois critères C1, C2, C3 dont les deux premiers sont additifs et le troisième de type « minimum-maximum », le point $z = (3, 2, 4)$ est dominé par le point 30 $z^\circ = (1, 1, 4)$ pour les critères C1 et C2 mais faiblement non dominé pour le critère C3. z et le chemin partiel correspondant sont donc

conservés. Cela permet de considérer tous les chemins efficaces possibles. Cependant, les solutions correspondant aux chemins efficaces finaux (produits à l'étape b) du procédé) sont toutes non dominées et non pas faiblement non dominées.

5 Tous les chemins possibles déterminés r^* sont alors stockés dans une mémoire du dispositif D (non représentée), ce qui garantit que le meilleur d'entre eux, compte tenu des critères et contraintes utilisées, n'a pas été omis.

10 Le module de traitement M forme ensuite une solution idéale $Z(\mathbf{y})$. Plus précisément, la solution idéale $Z(\mathbf{y})$ est un vecteur se présentant sous la forme d'un multiplet de composantes.

15 Ces composantes sont calculées comme suit. Pour chaque critère C_p , on extrait la meilleure valeur de performance Z^{*p} observée sur les chemins possibles. Chaque meilleure valeur de performance Z^{*p} observée est appelée valeur optimale associée au critère correspondant. Les différentes valeurs optimales constituent alors les composantes de la solution idéale $Z(\mathbf{y}) = (Z^{*1}, Z^{*2}, \dots, Z^{*p})$, représentative d'un chemin idéal \mathbf{y} .

20 Il est important de noter que le chemin idéal \mathbf{y} , représenté par la solution idéale $Z(\mathbf{y})$, ne correspond pas forcément à l'un des chemins possibles r^* du jeu de chemins possibles déterminés. C'est même rarement le cas, dans la mesure où les liaisons sur lesquelles sont observées les valeurs optimales constituent rarement une séquence connexe. Néanmoins, lorsque c'est le cas, il constitue l'unique chemin possible r^* puisqu'il domine tous les autres.

Le module de traitement M soumet ensuite les différents chemins possibles à au moins une contrainte globale choisie.

30 On entend ici par « contraintes globales » des contraintes pouvant être appliquées à des chemins par opposition aux contraintes

locales qui s'appliquent aux liaisons (ou liens) entre nœuds. Il pourra s'agir, par exemple, de la bande passante minimale requise, de la longueur maximale du chemin, du nombre de sauts maximal du chemin, et de la durée maximale du chemin.

5 Le module de traitement M retient les chemins possibles r^* qui ne violent pas la ou les contraintes globales utilisées. Dans le cas d'un routage de type best effort, ce traitement est bien entendu omis.

Le module de traitement M attribue ensuite à chaque chemin possible r^* une valeur d'intérêt (ou « path value ») $U(r)$ compte tenu de
10 la solution idéale $Z(\vartheta)$.

A cet effet, on peut utiliser une fonction de scalarisation classique, comme par exemple une fonction de Tchebychev pondérée, fonction des différences entre les composantes $Z_p(r)$ de la valeur de performance $Z(r)$ du chemin concerné r et les composantes correspondantes $Z_p(\vartheta)$, représentatives du chemin idéal ϑ . Une telle fonction peut se présenter sous la forme $U(r) = \text{MAX}_{p=1 \text{ à } P} \{W_p(Z_p(r) - Z_p(\vartheta))\}$, où W_p est un coefficient de pondération du critère C_p choisi lors de la configuration du dispositif et permettant de donner aux critères, éventuellement, des poids relatifs différents. Cette valeur 15 d'intérêt quantifie l'écart de performance qui sépare un chemin possible r^* du chemin idéal ϑ , compte tenu des poids respectifs accordés aux différents critères utilisés.
20

Le module de traitement M classe ensuite les chemins possibles r^* compte tenu de leurs valeurs d'intérêt $U(r)$ respectives.
25 Avec la définition de la valeur d'intérêt $U(r)$ donnée ci-dessus, les chemins possibles sont classés par ordre de valeur d'intérêt croissante, la valeur d'intérêt $U(r)$ la plus petite correspondant au chemin possible r^* le mieux approprié au transfert des données, compte tenu des critères et contraintes utilisés. Le classement est donc 30 effectué par rapport à un point idéal inféré par les données et non à partir d'une comparaison fondée sur des valeurs arbitraires.

Puis, il sélectionne parmi les chemins possibles classés les k chemins les mieux classés, de manière à router des données via l'un de ces k chemins, et de préférence celui qui est le mieux classé (valeur d'intérêt $U(r)$ la plus petite dans l'exemple décrit). K est un entier qui peut être compris, par exemple, entre 1 et 5. Il est important de noter que le nombre de chemins trouvés par le traitement décrit ci-dessus peut être inférieur à k .

Dans ce qui précède, il a été question de critères et contraintes (locales et globales) qui peuvent sembler, dans certains cas, sensiblement identiques. En fait, ils peuvent être considérés comme des attributs de sélection qui se matérialisent parfois sous la forme de critères, parfois sous la forme de contraintes, sachant qu'un critère fait généralement l'objet d'une maximisation ou d'une minimisation tandis qu'une contrainte est généralement définie par une ou deux valeurs, fixées ou limitatives.

Ces attributs de sélection sont définis par l'opérateur du réseau lors de la configuration du réseau, et dépendent du type de service requis, par exemple l'envoi d'un e-mail ou une demande d'établissement de visio-conférence, et/ou de la qualité de service (ou QoS) requise lors de la réservation initiale de ressources. Plus précisément encore, on choisit les critères en fonction du type de service requis, tandis que l'on choisit les contraintes, et leurs valeurs, en fonction de la qualité de service requise.

L'invention offre également un procédé de détermination de chemin(s) de routage de données dans un réseau de communications comportant une multiplicité de nœuds.

Celui-ci peut être mis en œuvre à l'aide du dispositif D présenté ci-dessus. Les fonctions et sous-fonctions principales et optionnelles assurées par les étapes de ce procédé étant sensiblement identiques à celles assurées par les différents moyens constituant le dispositif D, seules seront résumées ci-après les étapes mettant en

œuvre les fonctions principales du procédé selon l'invention.

Ce procédé se caractérise par la combinaison d'étapes suivante

- a) s'assurer de la connexité d'une partie au moins de la multiplicité de
5 nœuds,
- b) parmi les nœuds de cette partie, calculer des chemins possibles r^* entre un nœud de départ N_s et un nœud d'arrivée N_t , compte tenu d'au moins deux critères choisis (dont l'un est, de préférence, de type non additif, comme la bande passante), puis déduire une
10 solution idéale $Z(\mathfrak{r})$ des performances $Z(r^*)$ des chemins possibles r^* sur lesdits critères,
- c) attribuer à chaque chemin possible r^* une valeur d'intérêt $U(r^*)$ compte tenu de la solution idéale $Z(\mathfrak{r})$, puis classer les chemins possibles r^* compte tenu de leurs valeurs d'intérêt respectives, et
15
- d) sélectionner parmi les chemins possibles classés les k chemins les mieux classés, de manière à router des données via l'un de ces k chemins.

Afin de permettre un routage de type QoS, on peut, au début
20 de l'étape a), commencer par déterminer parmi la multiplicité de nœuds tous les couples de nœuds qui peuvent établir entre-eux une liaison orientée supportant toutes les contraintes locales choisies, puis s'assurer de la connexité de l'ensemble des nœuds de ces couples. En variante ou en complément, on peut, à la fin de l'étape b), retenir
25 parmi les chemins possibles ceux qui satisfont à toutes les contraintes globales choisies, de sorte qu'à l'étape c) on attribue des valeurs d'intérêt aux chemins possibles retenus.

L'invention ne se limite pas aux modes de réalisation de
30 procédés et dispositifs décrits ci-avant, seulement à titre d'exemple, mais elle englobe toutes les variantes que pourra envisager l'homme

de l'art dans le cadre des revendications ci-après.

Ainsi, dans ce qui précède, il a été décrit un mode de fonctionnement de type QoS dans lequel on prenait en compte des critères (au moins deux), au moins une contrainte locale et au moins une contrainte globale. Mais, d'autres modes de fonctionnement peuvent être envisagés. On peut ainsi envisager un mode de fonctionnement de type QoS, simplifié, dans lequel on prend en compte des critères (au moins deux) et au moins une contrainte locale, sans contrainte globale. On peut également envisager un autre mode de fonctionnement de type QoS, simplifié, dans lequel on prend en compte des critères (au moins deux) et au moins une contrainte globale, sans contrainte locale. Enfin, comme évoqué précédemment, on peut également envisager un mode de fonctionnement de type best effort, dans lequel on ne prend en compte que des critères (au moins deux).